WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

Трехмерные версии игры «Жизнь»

А. К. ДЬЮДНИ

У ПОПУЛЯРНОЙ ИГРЫ «Жизнь» с клеточными автоматами, игровые ситуации в которой разворачиваются на двумерном поле, теперь стали появляться трехмерные аналоги. К. Бейс, специалист по программированию в Южно-Каролинском университете, исследовал множество трехмерных версий, две из которых он считает заслуживающими наибольшего внимания. Бейс назвал их «Жизнь 4555» и «Жизнь 5766». В обеих этих версиях присутствуют многие свойства исходного варианта (такие образования, как «мигалки» и «планеры»), и одна из них, несомненно, станет достойным последователем игры, изобретенной в 1968 г. Дж. Конвеем из Кембриджского университета.

Игра Конвея, как, наверное, помнят многие читатели по нескольким статьям М. Гарднера в рубрике «Математические игры», разворачивается на бесконечной двумерной решетке квадратных клеток. Каждая клетка имеет восемь соседей (четыре по углам и четыре по сторонам) и может находиться в одном из двух состояний, живом или мертвом. Игра управляется часами, задающими такт. При каждом тактовом сигнале часов одни клетки могут оживать, другие умирать. Судьба каждой клетки определяется числом ее соседей, живых на данный момент. Например, если на каком-то такте у живой клетки окажется менее двух или более трех живых соседей, то на следующем такте она должна умереть. Здесь как бы моделируются неблагоприятные для клетки условия — недостаток питания или перенаселенность в среде обитания. В то же время мертвая клетка может снова ожить на следующем такте, если у нее в данный момент насчитывается ровно три живых соседа. Для рождения клетки, таким образом, необходимо наличие трех «родителей».

Конвей назвал свою игру «Жизнь» просто потому, что клетки могут быть либо живыми, либо мертвыми. Однако вскоре стало очевидно, что это название оказалось более подходящим, чем могло показаться с первого взгляда. Дело в том, что всевозможные образования из живых клеток демонстрируют сложное поведение, в чем-то подобное поведению живых организмов (см. верхний рисунок на с. 90). Оно носит циклический характер, на каждом такте часов конфигурации изменяются, но после некоторого конечного числа тактов исходные конфигурации возникают вновь. Некоторые образования остаются на месте, другие же путешествуют по всей решетке, перемещаясь за один такт на одну клетку в горизонтальном, вертикальном или диагональном направлении. Клеточные конфигурации обоих типов имеют образные названия. Среди стационарных конфигураций различают «маяки», «ульи», «мигалки» и «блоки». Примерами конфигураций-путешественников являются «планеры» и «космические корабли». Однако возможности игры Конвея не ограничиваются лишь имитацией природных явлений. Как я уже указывал в статье в рубрике «Занимательный компьютер» в июльском номере журнала за 1985 г., в плоском клеточном «пространстве» игры «Жизнь» можно построить даже компьютер.

Поэтому было бы, наверное, не удивительно, если бы в трехмерном клеточном пространстве аналоги игры Конвея оказались способными порождать еще более фантастичные конфигурации. Такими аналогами и являются уже упомянутые версии Бейса «Жизнь 4555» и «Жизнь 5766». Здесь клетка представляет собой уже не квадрат, а куб, а число кубов-соседей равно не 8, а 26.

Названия «Жизнь 4555» и «Жизнь 5766» были взяты из лаконичного лексикона, придуманного Бейсом. Первые две цифры служат критерием при определении судьбы живой клетки. Первая цифра указывает наименьшее число соседей, при котором клетка еще не погибает голодной смертью, а вторая цифра — максимальное число соседей, при котором клетка еще не погибает от перенаселенности среды обитания. Третья и четвертая цифры определяют судьбу мертвой клетки. Третья цифра указывает минимальное, а четвертая — максимальное число живых соседей, при котором мертвая клетка становится живой. (В каждой из рассматриваемых версий «Жизни» третья и четвертая цифры в названии версии будут совпадать, однако, вообще говоря, это не всегда так.) Таким образом, согласно системе обозначений Бейса, первоначальная версия игры Конвея будет иметь название «Жизнь 2333».

Правила игры «Жизнь 4555» так же просты, как и для варианта 2333. Живая на данный момент клетка умирает, если у нее менее четырех или более пяти живых соседей. В то же время мертвая клетка оживает, если у нее ровно пять живых соседей. Исследуя многочисленные варианты игры в этой области определяющих числовых параметров, Бейс впервые заинтересовался вариантом 4555, когда заметил, как на экране компьютера «Макинтош» начала вырисовываться любопытная конфигурация кубических «клеток», показанная на нижнем рисунке на с. 90. Это был трехмерный планер, который циклически проходит через четыре различных превращения, прежде чем вернуться к исходному состоянию. Каждая из этих конфигураций состояла из 10 кубических «клеток», образующих продолговатый странным образом притупленный объект, движущийся в пространстве подобно дивану, совершающему свободное падение.

Бейс решил провести более полное исследование варианта 4555, поставив ряд экспериментов с «первобытным бульоном». Задав в исходном состоянии случайным образом выбранные конфигурации живых клеток, он следил за эволюцией своего клеточного мира. В каждом поколении одни клетки-кубики умирали, другие оживали. Число клеток с каждым новым поколением уменьшалось, однако Бейс обнаружил некоторые любопытные стабильные образования, остававшиеся неизменными из поколения в поколение. Эти образования напоминали пьедесталы, кресты, ступеньки, шары и спортивные штанги (см. рисунок на с. 91). Другие исходные конфигурации порождали все новые стабильные образования, а также циклические, которым Бейс присваивал такие имена, как «ротор» или даже «лягающий мустанг».

Подобно физику, исследующему элементарные частицы, Бейс устраивал столкновения между планерами и другими мелкими конфигурациями, причем объекты сталкивались под всевозможными углами. «Среди наиболее удивительных столкновений, — пишет он, — можно выделить столкновение планера с шариком, при котором суммарная масса осколков увеличивается до 29, что само по себе не так уж примечательно. Но затем после нескольких поколений внезапно снова появляется планер, несколько переместившийся от места столкновения».

Все то, что развивается из первобытного бульона, и даже результаты

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

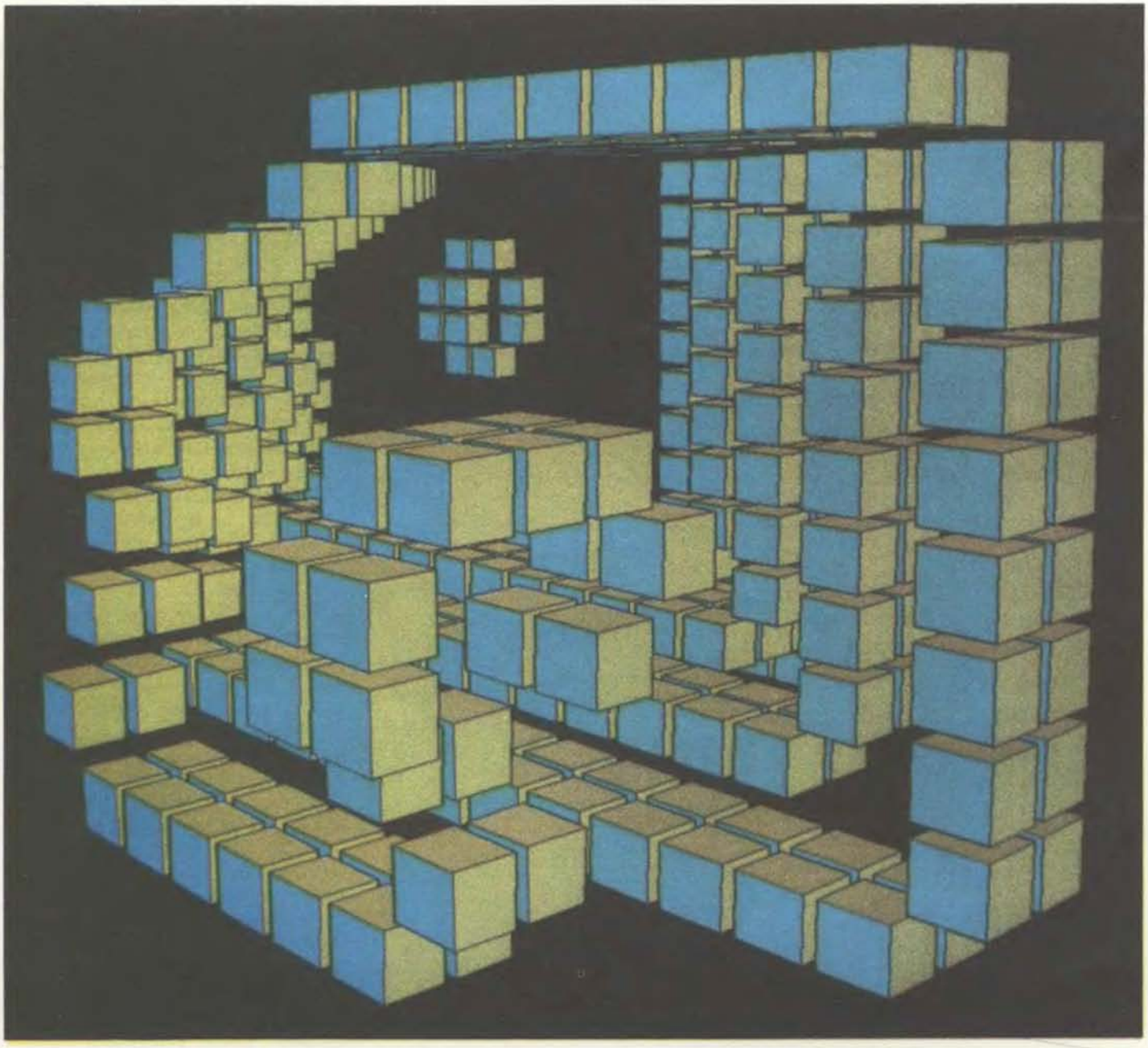
столкновений планеров между собой и с другими объектами Бейс называет природой. Некоторые конфигурации получить нетрудно. Другие же, более экзотические образования требуют для своего воссоздания значительно бóльших усилий. Можно, например, сцепить друг с другом несколько конфигураций, имеющих форму арки, и получить таким образом новое стабильное образование, которое Бейс называет галереей. Возникает полный архитектурный ансамбль из заборов, лестниц, стен и цепей. Стены можно закручивать в спирали и множество других экзотических стабильных форм, ограниченных лишь воображением энтузиаста, исследующего возможности «Жизни 4555» (см. рисунок внизу).

Следует обратить внимание и на некоторые другие интересные явления. Среди прочих образований часто встречается объект из 7 кубиков под названием «привет». В отсутствие другого такого же привета это образование погибает. Планер, встретившись с приветом, оказывается захваченным и не может продолжить свое путешествие. Второй планер может случайно освободить своего собрата, столкнувшись с приветом и взорвав его.

Из двух наиболее плодотворных трехмерных версий, открытых Бейсом, «Жизнь 4555», по-видимому, нравится ему больше. Здесь можно отметить одно любопытное обстоятельство: цифры в названии «Жизнь 4555» получаются прибавлением 2 к соответствующим цифрам названия версии Конвея 2333. Возможно, это совпадение послужит предзнаменованием того, что именно «Жизнь 4555» станет достойным преемником игры Конвея.

Однако, строго говоря, «Жизнь 5766» имеет больше сходства с игрой Конвея по сравнению с вариантом 4555. В частности, при некоторых условиях «Жизнь 5766» моделирует версию Конвея на плоскости. Эти условия сформулированы в теореме, на которую наткнулся в своих исследованиях Бейс.

Представим себе, что мы смотрим сверху на плоскую решетку игры Конвея и видим какую-то конфигурацию живых (квадратных) клеток. Теперь поместим непосредственно над каж-



Планер проходит через стабильную улитку в трехмерном пространстве игры К. Бейса «Жизнь 4555»

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

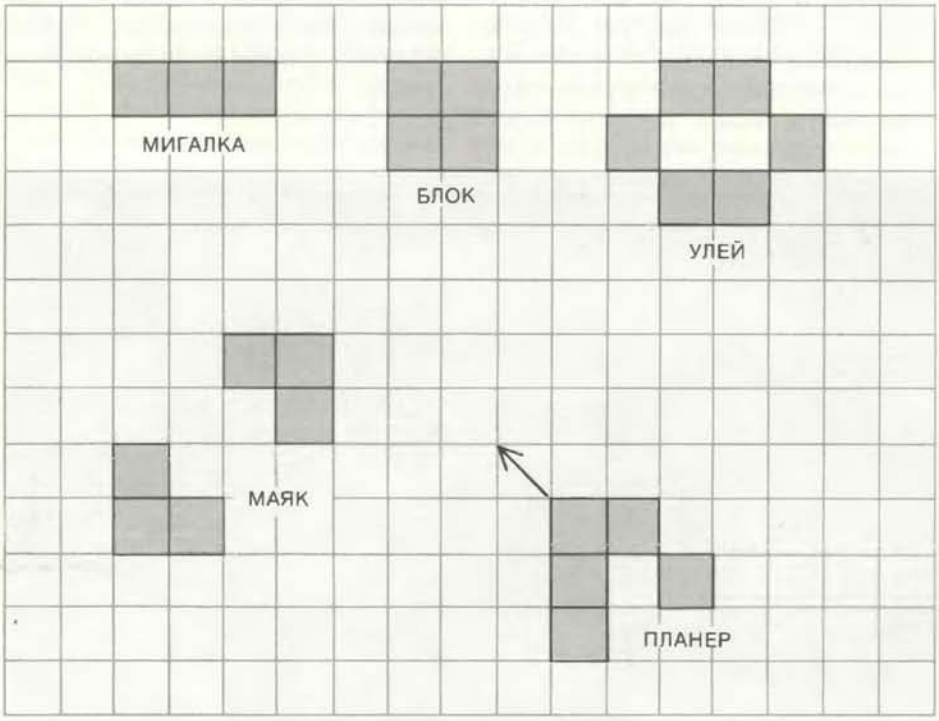
дой клеткой конфигурации и под ней по одному живому кубу. Следуя правилам игры «Жизнь 5766», эти кубические «клетки» будут неограниченно долго точно копировать поведение «бутерброда» из клеток Конвея тогда (и только тогда), когда будут выполнены два условия:

1. Ни одна живая клетка на плоскости никогда не имеет 5 живых соседей.

2. Ни одна мертвая клетка на плоскости никогда не имеет 6 живых соседей.

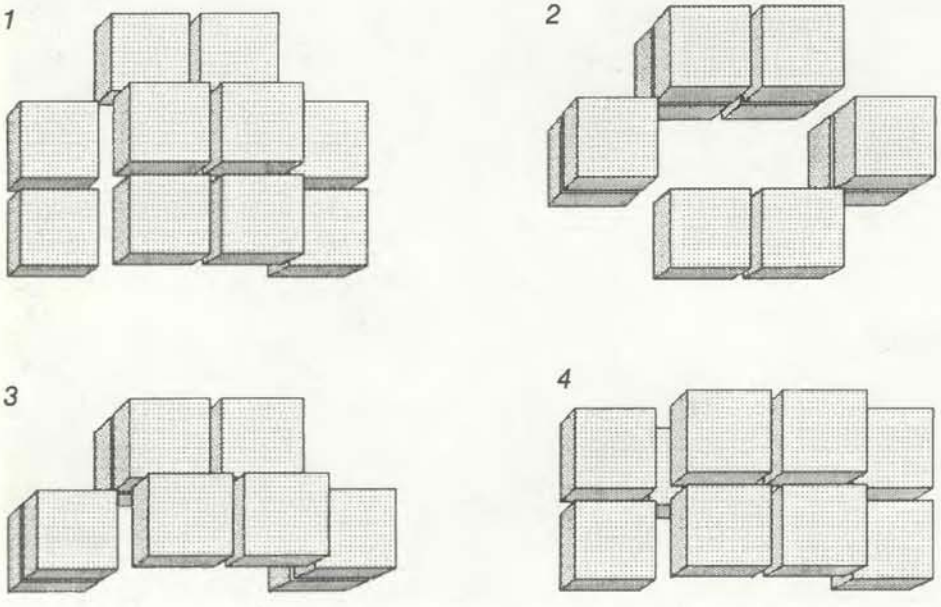
Многие конфигурации «Жизни», в том числе и планер Конвея, удовлетворяют указанным условиям. Планер в пространстве «Жизни 5766» можно создать, преобразовав клетки двумерного планера в кубы. Такой планер занимает два прилегающих друг к другу слоя клеток в трехмерном пространстве и будет двигаться всегда в пределах этих слоев (см. рисунок на с. 92).

Многие другие простые объекты «Жизни» Конвея, такие, как маяк, улей, мигалка и блок, а также более экзотические образования, такие, как лодка и часы, также удовлетворяют условиям теоремы Бейса. Эти объекты существуют в двухслойном виде как конфигурации «Жизни 5766», которые ведут себя точно так же, как и их двумерные аналоги. К сожалению, не все конфигурации игры Конвея удовлетворяют критериям теоремы. Среди этих «неподдающихся» объектов — знаменитая катапульта, запускающая планеры, которая была открыта Р. Госпером в 1970 г., когда он был еще студентом Массачусетского технологического института. Проследив за катапультой, мы видим, что на любой стадии ее жизненного цикла у нее имеются живые клетки с пятью живыми соседями. Любые нарушения какого-либо условия теоремы Бейса приводят к отклонению от модели. «Когда это происходит, — рассказывает Бейс, — объект, до тех пор ограниченный двумя плоскостями, почти во всех случаях превращается в округлую трехмерную массу, которая обычно довольно быстро погибает».



Некоторые формы двумерной игры «Жизнь» Дж. Х. Конвея

Можно добиться более полного моделирования версии Конвея на основе «Жизни 5766», если воздвигнуть то, что Бейс называет барьером времени-пространства. Он состоит из единой поверхности живых клеток, в которой как бы просверлены дырки (см. рисунок на с. 93). Дырки расположены таким образом, чтобы каждый куб в барьере имел ровно 7 соседей. Клетки-кубы, принадлежащие барьеру, едва-едва избегают гибели от перенаселения среды, в то время как любой куб, непосредственно прилегающий к барьеру, всегда будет иметь более 6 живых соседей и потому никогда не оживет. Образующейся в результате мертвой зоной с каждой стороны от барьера можно воспользоваться для точного воспроизведения «Жизни» Конвея. Для этого нужно соорудить два параллельных барьера времени-пространства на расстоянии четырех кубов друг от друга. Из четырех заключенных между ними плоскостей две центральные могут поддерживать все формы жизни, потому что теперь условия теоремы Бейса удовлетворяются для любой популяции живых клеток, находящихся посередине этого «бутерброда».



Планер в «Жизни 4555»

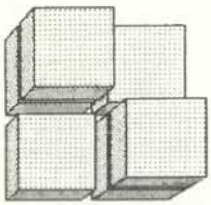
Несмотря на то что «Жизнь 5766» способна в той или иной мере имитировать версию Конвея, ее клеточный мир все же не так красив и привлекателен. Как свидетельствует Бейс, случайно выбранные первобытные бульоны «Жизни 5766», кажется, всегда достигают «установившегося состояния» быстрее по сравнению с «Жизнью 4555». Неустановившийся характер «Жизни 4555» говорит о ее

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

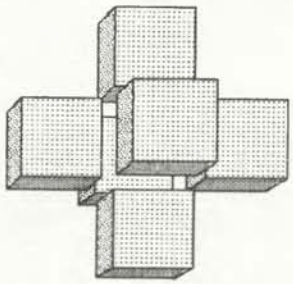
более богатых вычислительных возможностях. В самом деле, «Жизнь 4555» изобилует стабильными и осциллирующими формами, которые обладают свойством симметрии. Возможно, окончательное решение вопроса о том, какая версия станет наиболее достойным преемником «Жизни» Конвея, будет зависеть от того, удастся ли смоделировать двумерную игру при помощи «Жизни 4555». В случае успеха эта версия окажется во всех отношениях лучше, чем «Жизнь 5766».

Бейс написал брошюру на 40 страницах под названием «Трехмерная игра «Жизнь»». Она содержит в себе все, о чем мы здесь говорили, и много больше, включая советы по эффективному программированию игр. Бейс располагает также программой для компьютера «Макинтош», которая моделирует обе версии трехмерной жизни.

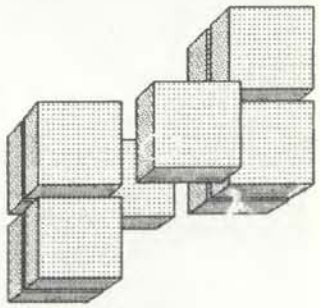
Программу, вычисляющую и показывающую последовательные поколения любой формы трехмерной вер-



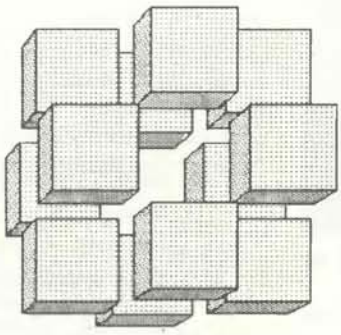
ПЬЕДЕСТАЛ



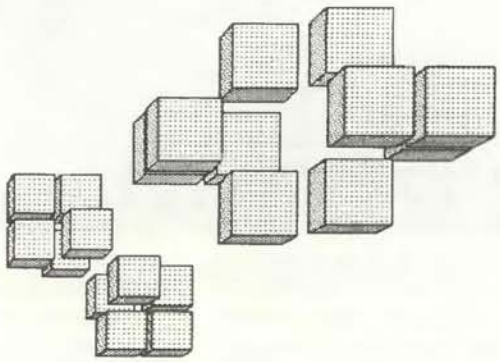
КРЕСТ



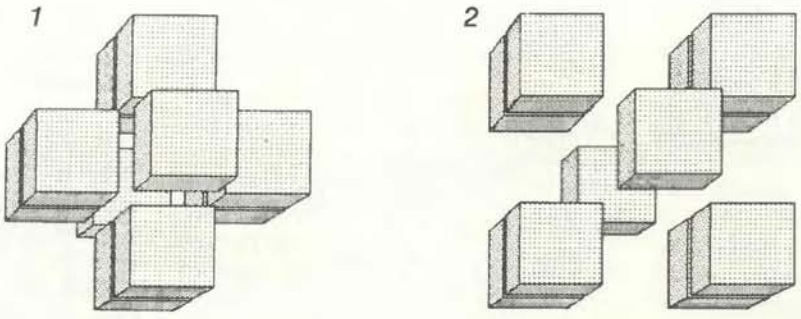
СТУПЕНЬКА



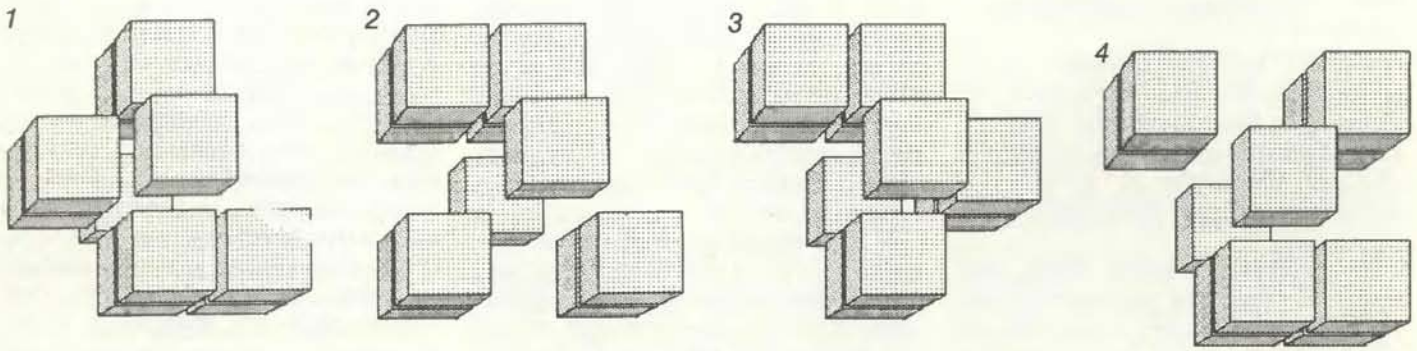
ШАР



ШТАНГА



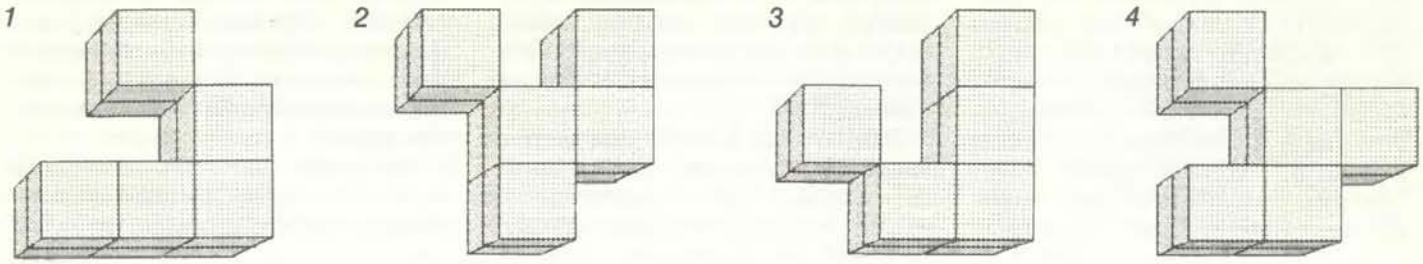
РОТОР



ЛЯГАЮЩИЙ МУСТАНГ

Стабильные и циклические формы «Жизни 4555»

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NARODU.RU



Планер в трехмерной игре Бейса «Жизнь 5766»

сии игры, написать нетрудно, по крайней мере в принципе. Программу можно даже модифицировать так, чтобы она пробовала различные правила, и, может быть, читателям удастся открыть третью удачную трехмерную версию «Жизни», которую Бейс мог упустить в своих исследованиях.

Два больших трехмерных массива *cells* (клетки) и *newcells* (новые клетки) имеют три индекса *i*, *j* и *k*, соответствующие трем координатам клеточного пространства. Содержимое каждого элемента массива показывает, жива или мертва соответствующая клетка. Пусть 1 означает живое состояние а 0 — мертвое.

Не удивительно, что для вычисления статуса каждой клетки в каждом поколении требуются три вложенных цикла. Самый внешний цикл с индексом *i* служит для вычисления последовательности плоскостей, проходящих через все пространство игры. В этот цикл вложены два других с индексами *j* и *k*. В цикле по *j* происходит вычисление последовательных строк в пределах каждой плоскости, а в цикле по *k* вычисляется состояние последовательных клеток в строке. В качестве руководства можно воспользоваться следующей схемой:

```
for i = 1 to 30
  for j = 1 to 30
    for k = 1 to 30
      вычислить соседей
      определить состояние
      высветить живые клетки
```

Число 30, конечно, выбрано произвольно. Однако лишь читателям, обладающим неограниченным терпением, можно поэкспериментировать с числами, большими 30, потому что время вычислений становится очень большим.

Во внутреннем цикле перед программой стоят три основные задачи. Чтобы решить задачу вычисления соседей, программе нужно исследовать состояние 26 соседей каждой клетки и подсчитать число живых на данный момент. Это можно сделать при помощи трех миниатюрных циклов или путем перечисления всех возможных координат 26 клеток. Если воспользоваться конструкцией с циклами, то их можно расписать по следующему алгоритму:

```
tot ← 0
for l = i − 1 to i + 1
  for m = j − 1 to j + 1
    for n = k − 1 to k + 1
      if cells(l, m, n) = 1
        then tot ← tot + 1
tot ← tot − cells(i, j, k)
```

Здесь переменная *tot* (от слова total — полный) хранит суммарное число живых соседей. Последняя строчка в алгоритме нужна для того, чтобы состояние самой клетки *cells* (*i*, *j*, *k*) не влияло на подсчитываемую сумму.

Определив величину *tot* — полное число живых соседей, программа должна затем определить новое состояние рассматриваемой в данный момент клетки *cells* (*i*, *j*, *k*). Задача определения состояния сводится к простой проверке значения *tot* в отношении к состоянию клетки *cells* (*i*, *j*, *k*):

```
if cells(i, j, k) = 0
  then if tot = 5
       then newcells(i, j, k) ← 1
       else newcells(i, j, k) ← 0
if cells(i, j, k) = 1
  then if tot < 4 or tot > 5
       then newcells(i, j, k) ← 0
       else newcells(i, j, k) ← 1
```

Здесь я предполагал, что читатель программирует игру «Жизнь 4555». Можно несколько изменить алгоритм, чтобы приспособить его к версии 5766 или сделать его достаточно общим, чтобы охватить любые трехмерные правила. Рассмотрим последнюю возможность.

В универсальном виде описанный выше алгоритм вычисления состояния можно записать, воспользовавшись четырьмя переменными, которые Бейс назвал как *el*, *eu*, *fl*, *fu*. Буквы *e* и *f* означают соответственно среду (environment) и плодовитость (fertility), а буквы *l* и *u* соответственно нижний (lower) и верхний (upper). Таким образом, *el* и *eu* — это нижняя и верхняя границы, в которые должна попасть клетка, чтобы продолжить жизнь в следующем поколении. Клетка останется живой, если число окружающих ее живых соседей больше или равно *el*, но меньше или равно величине *eu*. Аналогично, величины *fl* и *fu* — это границы, в которые должна попасть мертвая клетка, чтобы ожить в следующем поколении. Это произойдет, если число живых кубов в окрестности клетки больше или равно *fl*, но меньше или равно *fu*. В этих обозначениях общий алгоритм приобретает следующий вид:

```
if cells(i, j, k) = 0
  then if tot < fl or tot > fu
       then newcells(i, j, k) ← 0
       else newcells(i, j, k) ← 1
if cells(i, j, k) = 1
  then if tot < el or tot > eu
       then newcells(i, j, k) ← 0
       else newcells(i, j, k) ← 1
```

Здесь в любой версии трехмерной жизни программа должна перевести содержимое массива *newcells* в массив *cells* при помощи тройного цикла. Таким образом, массив *newcells* освобождается для следующего поколения живых кубов.

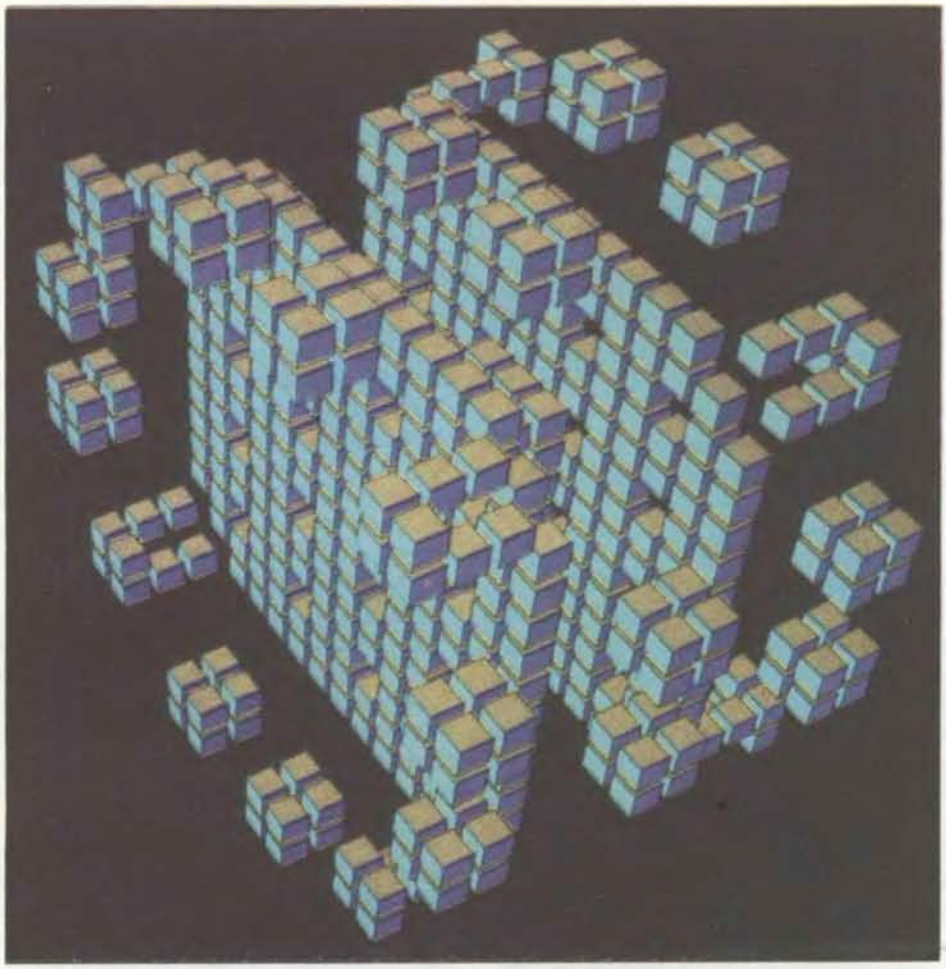
В заключительной стадии рассматриваемого нами алгоритма, обозначенной как «высветить живые клетки», программа должна изобразить соответствующий куб при условии, что он находится в живом состоянии. При изображении кубов на экране мы советуем закрашивать видимые поверхности. Если оставлять рисунок в скелетном виде, то изображение получается очень сложным и непонятным. Простейший способ сделать невидимыми кубы, расположенные за видимыми поверхностями, заключается в том, чтобы *i* — индекс внешнего цикла — пробегал значения, соответствующие оси, ведущей из глубины экрана к зрителю. Тот печальный факт, что некоторые кубики становятся, таким образом, невидимыми, — единственный недостаток, прису-

WWW.SCIAM-MAGAZINE.NAROD.RU

щий всем трехмерным версиям «Жизни». Мы не имеет возможности охватить взглядом все, что происходит в пространстве, как мы могли это сделать в двумерной версии Конвея. В то же время этот недостаток любой трехмерной игры присущ и всему нашему трехмерному миру. Мы не можем видеть всего того, что в нем происходит. И можно сказать, что это к нашему счастью.

После того как в программе реализована последняя стадия, процесс ее выполнения становится довольно медленным. Можно добиться некоторого ускорения, заменив кубы сферами (на самом деле заштрихованными дисками, размеры которых изменяются в зависимости от их «глубины» на экране). Нужно сказать, что в брошюре Бейса, о которой мы говорили, есть рецепты, позволяющие добиться увеличения скорости на несколько порядков.

Как всегда, я с радостью расскажу обо всех необычных, интересных явлениях, которые будут открыты читателями. Во-первых, удастся ли неутомимым исследователям, всегда стремящимся к обобщению, найти какие-нибудь формы трехмерной жизни (стóящие такого названия), которые, возможно, упустил Бейс? Во-вторых, читателям, наверное, будет интересно поэкспериментировать со своими собственными рецептами первобытного бульона. Ну а в остальном, кто знает, сколько еще существует неоткрытых планеров, космических кораблей, катапульт и других интересных образований! Но чтобы не дублировать результатов, достигнутых Бейсом, следует обязательно изучить брошюру «Трехмерная игра «Жизнь»».



Два барьера времени-пространства в «Жизни 5766»

ИГРА ПОД названием «Звездный бой» (Star trek), о которой речь шла в первом номере журнала за этот год, оказывается, существовала, если не по названию, то по сути, еще задолго до появления на телевизионных экранах популярного многосерийного фильма с этим названием. Р. Нельсон-младший из Остина (шт. Техас) вспоминает, как в начале 60-х годов появилась игра под названием «Космическая война» — прабабушка всех игр, в которых космические корабли охотятся друг за другом. Программа была написана для ЭВМ PDP-1 в Массачусетском технологическом институте. Авторы игры, аспиранты МТИ, очень гордились своим изобретением. Об этом можно прочитать в августовском номере журнала «Creative Computing» за 1981 г. (см. библиографию).

Машина PDP-1 была плохо приспособлена для программирования подобных игр, и входные параметры вводились в нее с операторского пульта. Дж. Грэтц, один из авторов игры, вспоминает, в какой атмосфере проходили состязания: «Если мы загорались какой-нибудь идеей, для нас не было ничего невозможного . . . «Космическая война» прекрасно работала с ключей регистра операторского пульта, правда, монитор терминала был расположен несколько в стороне, так что один из игроков получал преимущество, потому что ему было удобнее наблюдать за событиями на экране. Важнее было, наверное, то, что двое возбужденных бойцов теснились в ограниченном пространстве, рассчитанном на одного спокойно работающего оператора, поэтому постоянно возникала опасность поломки оборудования».

Программа варианта «Космической войны», описанная в январском номере журнала, не удовлетворила К. Ван-Еселтайна из Скулкрафта (шт. Мичиган). Она показалась ему настолько медленной, что он назвал ее «Звездным трактором» (Star truck). Она стала достойной названия «Звездный бой» (Star trek) лишь после того, как он нашел способ удалить бóльшую часть арифметических операций с плавающей запятой из главного цикла программы. Чтобы не вычислять квадратных корней по ходу выполнения программы, он заранее рассчитал двумерный массив расстояний от всех возможных точек (x, y) до начала координат (0,0). Теперь расстояние между любыми двумя точками (x_1, y_1) и (x_2, y_2) можно получить очень просто, посмотрев в таблице расстояние для координат $(x_2 - x_1, y_2 - y_1)$. Ван-Еселтайн затабулировал также значения синуса и косинуса в двух массивах по 36 элементов в каждом, по одному элементу на каждые 10 градусов. Кроме того, он пришел к выводу, что с ракетами легче управляться, если их всегда ровно 20. Разумеется, на любой конкретный момент многие из них могут оказаться виртуальными, в этом случае они просто не отображаются. Далее, массивы, задающие скорость, должны быть не двумерными, а спаренными одномерными. На многих персональных компьютерах такое простое новое определение может дать значительную экономию времени. Целеустремленные читатели, несомненно, сами дойдут до многих других усовершенствований, позволяющих ускорить программу Ван-Еселтайна.